

⑯ BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENTAMT

# ⑯ Offenlegungsschrift

⑯ DE 195 31 466 A 1

⑯ Int. Cl. 6:

H 01 J 37/28

G 02 B 21/00

// G 01 H 11/06

⑯ Aktenzeichen: 195 31 466.2  
⑯ Anmeldetag: 26. 8. 95  
⑯ Offenlegungstag: 2. 10. 96

⑯ Innere Priorität: ⑯ ⑯ ⑯

30.03.95 DE 195116127

⑯ Anmelder:

Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung  
Dresden e.V., 01069 Dresden, DE; Carl Zeiss Jena  
GmbH, 07745 Jena, DE

⑯ Erfinder:

Weihnacht, Manfred, Dr., 01744 Malter-Paulsdorf,  
DE; Martin, Günter, Dr., 01307 Dresden, DE; Bartzke,  
Karlheinz, Dr., 07747 Jena, DE; Richter, Wolfgang,  
Prof. Dr., 99425 Weimar, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Mikromechanische Sonde für Rastermikroskope

⑯ Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine universell anwendbare mikromechanische Sonde für Rastermikroskope zu schaffen, die rastermikroskopische Untersuchungen mit einer höheren lateralen Auflösung und hohen Meßgeschwindigkeit garantiert.

Die Sonde besteht aus einem Träger und einem damit verbundenen, als Schichtpaket ausgebildeten Ausleger, der mindestens eine Piezoschicht und mehrere Metallschichten enthält und der an seinem freien Ende eine Mikrotastspitze trägt, wobei der mehrschichtige Ausleger die Sondenfunktionen zur Durchführung der Atom-Kraft-Mikroskopie (AFM), der Raster-Tunnel-Mikroskopie (STM) und der optischen Nahfeldmikroskopie (SNOM) in sich vereint, indem an die Piezoschicht(en) eine Wechselspannung angelegt ist, deren Frequenz mit einer der Resonanzfrequenzen des Auslegers übereinstimmt, und indem der Ausleger mindestens eine Lichteiterschicht enthält, die mit einer optisch transparenten Mikrotastspitze lichtleitend verbunden ist.  
Mit der Sonde können topologische, elektrische und optische Meßdaten von Oberflächen gewonnen werden.

DE 195 31 466 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingesetzten

DE 195 31 466 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Meßtechnik und betrifft eine mikromechanische Sonde für Rastermikroskope. Die Sonde ist anwendbar für die Atom-Kraft-Mikroskopie (AFM), die Raster-Tunnel-Mikroskopie (STM) und die optische Nahfeldmikroskopie (SNOM), mit denen topologische, elektrische und optische Meßdaten von Oberflächen gewonnen werden können.

Bei der AFM und der STM wird eine an einer Sonde angeordnete Mikrotastspitze im Abstand von wenigen Nanometern über die zu untersuchende Oberfläche geführt. Ausgewertet werden bei der AFM die von der Mikrotastspitze erfaßten zwischenatomaren Kräfte und im Falle der STM der Tunnelstrom von einigen nA, der sich bei einer Spannung von wenigen mV zwischen Spalte und einer elektrisch leitfähigen Oberfläche einstellt. Wesentlich bei der technischen Realisierung sind Piezosteller, die mit Auflösungen von Picometern die Sondenführung im Nahfeld der Oberfläche gestatten. Eine die Wechselwirkung erfassende Meßtechnik und ein Regelmechanismus halten beim Scannen den Abstand zwischen Mikrotastspitze und zu untersuchender Oberfläche auf Picometer konstant. Bei der SNOM besteht die Sonde in der Regel aus einer optisch transparenten Spalte mit einer Apertur wesentlich kleiner als die Wellenlänge des Lichtes. Die Sonde wird im Nahfeld über die zu untersuchende Probe geführt und dient dazu, aus ihrer Apertur austretendes Licht auf die Probe zu senden. Außerdem dient die Sonde auch als Lichtempfänger oder bei Totalreflexion des Lichtes an der Probenoberfläche im evaneszenten Feld zum Absaugen von Photonen.

Mikromechanische Sonden für die AFM und die STM sind in verschiedenen Ausführungsformen bereits bekannt.

So ist beispielweise in der US-PS 4 912 822 eine für die STM konzipierte Anordnung beschrieben, die statische Bewegungen in 3 aufeinander senkrecht stehenden Koordinatenrichtungen ermöglicht. Die Anordnung, die nach dem Cantilever-Prinzip aufgebaut ist und mittels Mikroelektroniktechnologien hergestellt wird, hat die Form eines Auslegers mit am Ende befindlicher Mikrotastspitze. Der Ausleger ist als Schichtpaket ausgebildet, das aus 2 Piezoschichten und einer Vielzahl von als Elektroden dienenden Metallschichten besteht. Die Metallschichten sind oberhalb, unterhalb und zwischen den Piezoschichten und auch seitlich voneinander angeordnet. Die Mikrotastspitze ist aus Tantal oder einem anderen elektrisch leitfähigen Werkstoff hergestellt und senkrecht auf der Oberfläche des Schichtpaketes angeordnet. Die Bewegungen des Auslegers dienen der Annäherung der Mikrotastspitze an die zu untersuchende Oberfläche und der seitlichen Führung über die Oberfläche. Die Bewegungen werden ermöglicht durch Ausnutzung des reziproken piezoelektrischen Effekts in dünnen Schichten, die beidseits von Elektroden umgeben sind. Durch Anlegen von elektrischen Spannungen an die Elektroden des Schichtpaketes wird das Schichtpaket deformiert. Die Deformation ist als Längsdehnung und Verbiegung möglich. Damit ist es möglich, die Mikrotastspitze in allen 3 Raumrichtungen zu bewegen. Je nach Erfordernis werden dazu unterschiedliche elektrische Gleichspannungspotentiale an ausgewählte Elektrodenpaare gelegt. Diese Potentiale führen zu Bewegungen in Längs-, Dicken- und Querrichtung sowie zur Verkippung der Mikrotastspitze. Damit kann die Mi-

krotastspitze sowohl definiert der Oberfläche angenähert als auch seitlich bewegt und gekippt werden. Zum Beispiel ist vorgesehen, die Mikrotastspitze mit Hilfe der angelegten Spannungen in einem solchen Abstand 5 zu einer leitenden Oberfläche zu halten, daß der Tunnelstrom zwischen Tastspitze und Oberfläche konstant ist. Die Anwendungsmöglichkeit dieser Anordnung ist auf die STM beschränkt.

Bekannt ist auch eine mikromechanische Sonde, die 10 aus einem Schwingquarz und einer Tastnadel besteht (Intern. Journ. Optoelectronics, 1993, Vol. 8, Nos. 5/6. 669-676). Die piezoelektrisch erregte Tastnadel schwingt mit einer Frequenz von 1 MHz senkrecht zu der zu untersuchenden Probenoberfläche und gestattet 15 eine materialschonende Bestimmung der abstoßenden Kräfte aus der Messung des Phasenverhaltens der im Kraftfeld der Probe schwingenden Nadelspitze auf rein elektrischem Wege. Die Anwendung dieser Sonde ist auf die AFM beschränkt. Ihre Kraftempfindlichkeit liegt 20 nur im Bereich von nN und die für die Meßdynamik maßgebende Zeitkonstante  $\tau$  nur im ms-Bereich.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine universell anwendbare mikromechanische Sonde für Rastermikroskope zu schaffen, die rastermikroskopische 25 Untersuchungen mit einer höheren lateralen Auflösung sowie mit einer im  $\mu$ s-Bereich liegenden kleineren Zeitkonstante ermöglicht und damit eine hohe Meßgeschwindigkeit garantiert.

Diese Aufgabe wird nach der Erfindung mit der in den 30 Patentansprüchen dargestellten mikromechanischen Sonde gelöst.

Die Sonde besteht aus einem Träger und einem damit verbundenen, als Schichtpaket ausgebildeten Ausleger, der mindestens eine Piezoschicht und mehrere Metallschichten enthält und der an seinem freien Ende eine Mikrotastspitze trägt, wobei der mehrschichtige Ausleger die Sondenfunktionen zur Durchführung der Atom-Kraft-Mikroskopie (AFM), der Raster-Tunnel-Mikroskopie (STM) und der optischen Nahfeldmikroskopie (SNOM) in sich vereint, indem an die Piezoschicht/en eine Wechselspannung angelegt ist, deren Frequenz mit einer der Resonanzfrequenzen des Auslegers übereinstimmt, und indem der Ausleger mindestens eine Lichtleiterbeschichtung enthält, die mit einer optisch transparenten 45 Mikrotastspitze lichtleitend verbunden ist.

Mach zweckmäßigen Ausgestaltungen der Erfindung ist an die Piezoschicht/en eine Wechselspannung angelegt, deren Frequenz mit der Längsresonanz des Auslegers übereinstimmt, und ist die Mikrotastspitze am freien 50 Ende des Auslegers an der Stirnseite der Lichtleiterbeschichtung angeordnet.

Zweckmäßigerweise kann das den Ausleger bildende Schichtpaket als Schichtsystem auf dem oder im Träger fortgeführt sein.

Die Piezoschicht/en können aus Zinkoxid (ZnO) oder Aluminiumnitrid (AlN) oder einem PZT-Werkstoff bestehen.

Nach einer Ausgestaltung der Erfindung können die Piezoschicht/en des Schichtpaketes am festen Ende des Auslegers beginnend sich nur über einen Teil der Länge des Auslegers erstrecken. Ebenso können die Metallschichten des Schichtpaketes am festen Ende des Auslegers beginnend sich nur über einen Teil der Länge des Auslegers erstrecken.

Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist die Metallschicht auf der Oberfläche der Piezoschicht stellenweise unterbrochen, derart, daß zwei streifenförmige, diametral angeordnete Piezoresonato-

ren vorliegen, die mit ihrem einen Ende in einem Schwingungsknoten miteinander verbunden sind.

Für den STM-Einsatz der Sonde kann zweckmäßig eine der Metallschichten bis an das Ende der Mikrotastspitze geführt sein.

Die Lichtwellenleiter-Schicht besteht erfundungsgemäß aus einem optisch hochbrechenden Werkstoff, vorzugsweise aus Siliciumcarbid (SiC).

Zweckmäßigerweise ist die Lichtwellenleiter-Schicht am freien Ende des Auslegers sich zur Mikrotastspitze hin verjüngend ausgebildet.

Die erfundungsgemäße mikromechanische Sonde zeichnet sich gegenüber dem Stand der Technik dadurch aus, daß diese für eine Multimoden-Rastersondenmikroskopie anwendbar ist, indem sie bei Rastermikroskopen universell für die AFM, die STM und die SNOM eingesetzt werden kann, mit denen topologische, elektrische und optische Meßdaten von Oberflächen gewonnen werden können. Von besonderem Vorteil sind auch die gegenüber den bekannten Lösungen wesentlich höheren Leistungsparameter. So bietet das erfundungsgemäße Lösungsprinzip die Möglichkeit einer wesentlichen Verringerung der Sondendimensionen. Auf diesem Wege läßt sich eine Verringerung der Massen und die Erhöhung der Betriebsfrequenz auf Werte weit über 1 MHz, beispielsweise in den Bereich von 50–100 MHz realisieren, und werden so die Tastempfindlichkeit beziehungsweise die laterale Auflösung mit ca. 50 nm sowie die Meßgeschwindigkeit wesentlich erhöht.

Vorteilhaft ist auch die erfundungsgemäße Einbeziehung der für die SNOM vorgesehenen lichtoptischen Mittel und deren Ausgestaltung. Hierach wird zur räumlichen Konzentration des Lichtes statt der bisher üblichen metallüberzogenen Sondenspitze ein rein dielektrischer Lichtwellenleiter aus einem besonders hochbrechenden Werkstoff verwendet. Dieser Lichtwellenleiter führt das Licht ohne nennenswerte Verluste an Reflexion oder Absorption. Infolge des besonders hohen Brechungsexponenten kann der Querschnitt des Lichtwellenleiters sehr gering sein, wodurch eine lokale Beleuchtung eines Objektes mit großer Lichtstärke oder die lokale Erfassung der Lichtintensität im Nahfeld eines Objektes mit geringen optischen Verlusten möglich ist. Dadurch kann die erforderliche Zeit zum Scannen eines mikroskopischen Bildes gegenüber den herkömmlichen Anordnungen verkürzt werden.

Nachstehend ist die Erfindung an Hand eines Ausführungsbeispiels der mikromechanischen Sonde näher erläutert. Die zugehörige Zeichnung zeigt die Sonde in 50 perspektivischer Darstellung.

Die dargestellte Sonde vereinigt in sich die für die Kraftmikroskopie, die Tunnelmikroskopie und die optische Nahfeldmikroskopie erforderlichen Funktionen und ist damit für Multimoden-Rastermikroskope einsetzbar.

Bei dieser Sonde ragt über einen Träger 1 ein Ausleger 2 hinaus, der mit zwei piezoelektrischen Resonatorzungen 3 und 4 ausgestattet ist. Am Ende der Resonatorzunge 3 befindet sich eine Tastspitze 5. Der Ausleger 60 2 besteht aus einem Schichtpaket, das aus einer Lichtwellenleiter-Schicht 6, einer ersten Metallschicht 7, einer piezoelektrischen Schicht 8 und einer zweiten Metallschicht 9 zusammensetzt. Die Metallschichten 7 und 9 weisen im Bereich des Trägers Kontaktstellen 10 bis 65 13 auf.

Die Resonatorzungen 3 und 4 werden mit Hilfe der piezoelektrischen Schicht 8 zu Längsschwingungen an-

geregt. Dazu wird zwischen die Metallschichten 7 und 9 über die Kontaktstellen 10 und 11 für die Resonatorzunge 3 und über die Kontaktstellen 12 und 13 für die Resonatorzunge 4 eine Wechselspannung gelegt. Ihre Frequenz wird so gewählt, daß die Wellenlänge der Längsschwingungen in den Resonatorzungen 3 bzw. 4 den vierfachen Wert der Länge der Resonatorzungen einnimmt. In diesem Fall schwingen die Enden der Resonatorzungen mit maximaler Amplitude, und an ihrer Verbindungsstelle entsteht ein Schwingungsknoten. Soll die Resonatorzunge nicht als Referenzresonator für die Resonatorzunge 3 benutzt werden, wird – in Abweichung zu diesem Ausführungsbeispiel – die zweite Metallschicht 9 an der Verbindungsstelle zwischen Resonatorzunge 3 und Resonatorzunge 4 nicht unterbrochen ausgeführt und die Wechselspannung wird z. B. nur an die Kontaktstellen 10 und 11 angelegt.

Bei Annäherung der in Längsrichtung schwingenden Tastspitze 5 an die Oberfläche einer zu untersuchenden Probe wirken Oberflächenkräfte auf die Tastspitze ein. Diese Einwirkung beeinflußt das Schwingverhalten der Resonatorzunge 3 in der Weise, daß die Resonanzfrequenz verschoben wird und die Schwingung eine Dämpfung erfährt. Diese Veränderungen können über das elektrische Zweipol-Verhalten der Resonatorzunge 3, das über die Kontaktstellen 10 und 11 gemessen wird, registriert und über einen Regelkreis zur Nachführung der Tastspitze entsprechend dem Oberflächenprofil benutzt werden. Bei mechanischer Entkopplung der bei- 30 den Resonatorzungen 3 und 4 kann die Resonatorzunge 4, die keine Tastspitze enthält und demzufolge ihre Resonanzfrequenz bei Annäherung an die Probenoberfläche nicht ändert, als Referenzresonator benutzt werden.

Die innerhalb des Schichtpaketes liegende Metallschicht 7 ist auf der Mikrotastspitze 5 bis an deren Ende geführt und dient so gleichzeitig als Elektrode zur Realisierung der tunnelmikroskopischen Funktion der Sonde.

In die Lichtwellenleiter-Schicht 6 wird über den Spalt zwischen Träger 1 und Resonatorzunge 4 Licht eingekoppelt, das sich in Richtung Tastspitze 5 ausbreitet und über diese auf die zu untersuchende Probe gelangt. Der Lichtweg kann auch in umgekehrter Richtung zur Detektion optischer Signale von der Probe benutzt werden. Mit Hilfe der oben beschriebenen Verfahrensweise, den Abstand der Tastspitze 5 zur Probenoberfläche konstant zu halten, kann die Probenoberfläche unter konstanten Bedingungen optisch untersucht werden.

#### Patentansprüche

1. Mikromechanische Sonde für Rastermikroskope, bestehend aus einem Träger und einem damit verbundenen, als Schichtpaket ausgebildeten Ausleger, der mindestens eine Piezoschicht und mehrere Metallschichten enthält und der an seinem freien Ende eine Mikrotastspitze trägt, dadurch gekennzeichnet, daß der mehrschichtige Ausleger (2) die Sondenfunktionen zur Durchführung der Atom-Kraft-Mikroskopie (AFM), der Raster-Tunnel-Mikroskopie (STM) und der optischen Nahfeldmikroskopie (SNOM) in sich vereint, indem an die Piezoschicht(en) (8) eine Wechselspannung angelegt ist, deren Frequenz mit einer der Resonanzfrequenzen des Auslegers (2) übereinstimmt, und indem der Ausleger (2) mindestens eine Lichtleiterschicht (6) enthält, die mit einer optisch transparenten Mikrotastspitze lichtleitend verbunden ist.

2. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, da-

durch gekennzeichnet, daß an die Piezoschicht/en (8) eine Wechselspannung angelegt ist, deren Frequenz mit der Längsresonanz des Auslegers (2) übereinstimmt, und daß die Mikrotastspitze (5) am freien Ende des Auslegers (2) an der Stirnseite der 5  
Lichtleiterschicht (6) angeordnet ist.

3. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das den Ausleger (2) bildende Schichtpaket als Schichtsystem auf dem oder im Träger (1) fortgeführt ist. 10

4. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Piezoschicht/en (8) aus Zinkoxid (ZnO) oder Aluminiumnitrid (AlN) oder einem PZT-Werkstoff bestehen.

5. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Piezoschicht/en (8) des Schichtpakets am festen Ende des Auslegers (2) beginnend sich nur über einen Teil der Länge 15  
des Auslegers (2) erstrecken.

6. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Metallschichten (7; 9) des Schichtpakets sich nur über einen Teil der Länge des Auslegers (2) erstrecken. 20

7. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine der Metallschichten (9) auf der Oberfläche der Piezoschicht (8) stellenweise unterbrochen ist, derart, daß zwei streifenförmige, diametral angeordnete Piezoresonatoren (3; 4) vorliegen, die mit ihrem einen Ende in einem Schwingungsknoten miteinander verbunden 25  
sind. 30

8. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine der Metallschichten (7) bis an das Ende der Mikrotastspitze (5) geführt ist. 35

9. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtwellenleiter-Schicht (6) aus einem optisch hochbrechenden Werkstoff, vorzugsweise aus Siliciumcarbid (SiC) besteht. 40

10. Mikromechanische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtwellenleiter-Schicht (6) am freien Ende des Auslegers (2) zur Mikrotastspitze (5) hin verjüngt ist. 45

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

**- Leerseite -**

